

## 6.2. PAROWANIE TERENOWE

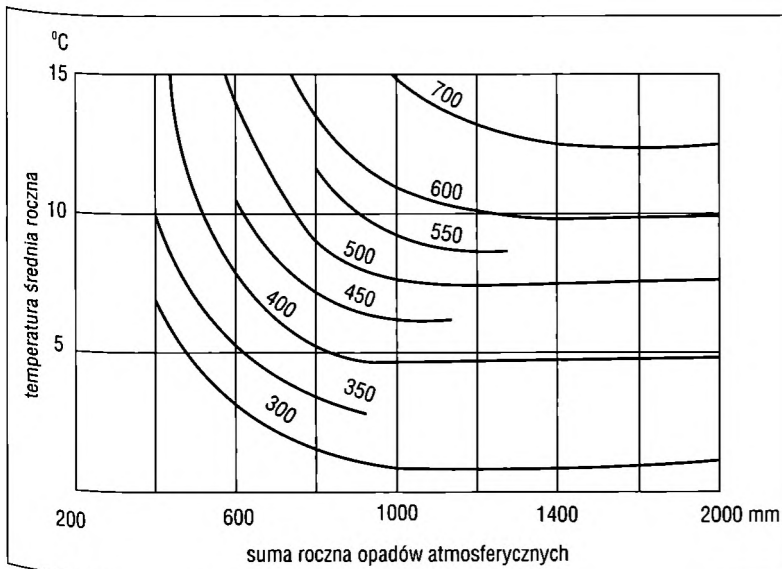
Wielkość parowania terenowego zależy od czynników fizycznych, glebowych i biologicznych. **Czynniki fizyczne** obejmują promieniowanie całkowite, niedosyt wilgotności powietrza oraz prędkość wiatru. **Czynniki glebowe** określają ilość wody w podłożu, która może brać udział w parowaniu, co jest uzależnione głównie od jego własności retencyjnych, natomiast **czynniki biologiczne** obejmują całokształt procesów przejścia wody przez organizm rośliny do atmosfery.

Pomiar i oszacowanie wielkości parowania terenowego nastręcza wiele trudności, toteż jego wartość jest często obliczana z różnicy między średnim rocznym opadem atmosferycznym i średnim rocznym odpływem. Istnieją jednak metody wykorzystujące zależność parowania od czynników fizycznych natury meteorologicznej. Wybór metody pozwalającej oszacować wielkość parowania zależy przede wszystkim od celu badań, wymaganej precyzji obliczeń oraz dostępności do danych. Najprostszą metodą służącą do obliczania parowania terenowego jest metoda Pardégo. Metodami wymagającymi dodatkowych danych meteorologicznych są metoda Konstantinowa oraz formuła Penmana.

**Metoda Pardégo** zakłada, iż suma roczna parowania terenowego zależy od rocznej sumy opadów i średniej rocznej temperatury powietrza. Zależność ta przedstawiona jest w formie nomogramu (ryc. 6.2.1). Rozkład parowania w poszczególnych miesiącach można



Do obliczenia wielkości parowania wykorzystuje się wyniki pomiarów wykonywanych na stacjach meteorologicznych (m.in. opadów, temperatury i wilgotności powietrza, prędkości wiatru, uśonecznienia)



Ryc. 6.2.1.  
Nomogram Pardégo  
(Dynowsky, 1971)

**niedosyt wilgotności powietrza [hPa, mb]** – różnica między maksymalną prężnością pary wodnej i prężnością aktualną w danych warunkach temperatury i ciśnienia

ustalić korzystając z zależności parowania od niedosytu wilgotności powietrza. Procentowy udział niedosytu wilgotności powietrza w poszczególnych miesiącach w stosunku do sumy rocznej parowania odpowiada procentowemu udziałowi parowania w poszczególnych miesiącach w odniesieniu do parowania rocznego odczytanego z nomogramu Pardégo.

**Metoda Konstantinowa** – w odróżnieniu od metody Pardégo – służy do wyznaczania wielkości parowania w krótkich okresach. Jest wygodna, nie wymaga pomiaru i obliczania wielu parametrów oraz pozwala uzyskiwać wyniki porównywalne z otrzymywanymi na drodze bilansu wodnego. Jest oparta o teorię dyfuzji turbulencyjnej pary wodnej, która zakłada, iż intensywność parowania zależy od pionowego zróżnicowania temperatury, wilgotności powietrza i prędkości wiatru w przyziemnej warstwie atmosfery. A.R. Konstantinow ustalił empiryczne związki pomiędzy pionowymi gradientami wilgotności powietrza oraz prędkością wiatru nad powierzchnią czynną i ciśnieniem pary wodnej w powietrzu, mierzonym standardowo na wysokości 2 m. Wyniki obliczeń zostały przedstawione w postaci nomogramu (ryc. 6.2.2). Dla Polski są zestawione w postaci tabel w pracy K. Dębskiego (1963). Aby z nich skorzystać, należy skorygować temperaturę powietrza  $t_k$  i ciśnienie pary wodnej w powietrzu  $e_k$  według wzorów:

$$t_k = t + \Delta t \quad (6.2.1)$$

$$e_k = e + \Delta e \quad (6.2.2)$$

gdzie:

$t$  – średnia dobową temperaturę powietrza na wysokości 2 m [°C],

$\Delta t$  – sezonowa poprawka temperatury powietrza [°C],

$e$  – średnia dobową wartość ciśnienia pary wodnej w powietrzu na wysokości 2 m [hPa],

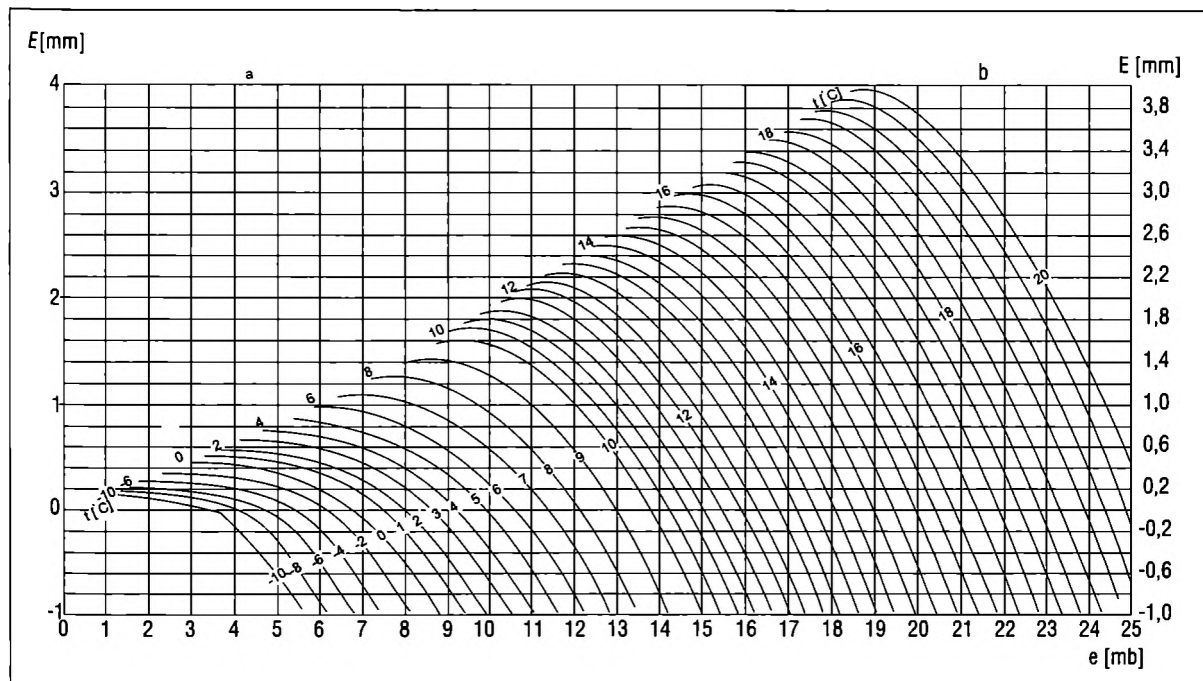
$\Delta e$  – sezonowa poprawka ciśnienia pary wodnej [hPa].

Poprawki temperatury powietrza – zależne od temperatury oraz od pory roku – odczytuje się z nomogramów lub tabel (tab. 6.2.1). Metodę powinno się stosować dla okresów nie krótszych niż dekada, choć w praktyce, za pomocą nomogramu, wyznacza się dobowe sumy parowania terenowego i na ich podstawie – sumy miesięczne, półroczne i roczne.

**Formuła Penmana** należy do grupy tzw. metod kombinowanych, bowiem jest ona oparta zarówno na metodzie bilansu cieplnego, jak i dyfuzji turbulencyjnej. Punktem wyjścia metody jest równanie bilansu cieplnego powierzchni czynnej:

$$R = EL + A + G \quad (6.2.3)$$

**ciśnienie pary wodnej (inaczej prężność pary wodnej) [hPa, mb]** – ciśnienie cząstkowe pary wodnej znajdującej się aktualnie w powietrzu



Ryc. 6.2.2. Nomogram Konstantinowa  
(Dynowsky, 1971)

gdzie:

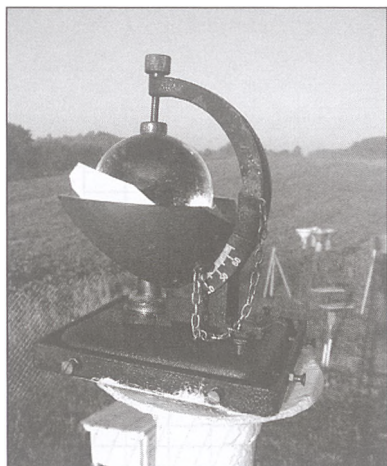
- $R$  – promieniowanie netto [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
- $E$  – natężenie parowania z powierzchni terenu [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ],
- $L$  – ciepło utajone parowania [ $2,512 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}$ ],
- $A$  – jawna wymiana ciepła z atmosferą [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
- $G$  – wymiana ciepła z gruntem [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

Wzór Penmana posiada liczne modyfikacje mające na celu uproszczenie obliczeń, przystosowanie wzoru do różnych warunków klimatycznych lub umożliwienie obliczeń przy braku pomiarów bilansu promieniowania. Na przykład, w modyfikacji francuskiej, formuła Penmana dla warunków Polski ma postać:

$$Et_p = N \left\{ G_0 (1 - \alpha) \left( 0,209 + 0,565 \frac{S}{S_0} \right) - \delta T^4 (0,56 - 0,08 e^{0,5}) \right. \\ \left. \left( 0,10 - 0,90 \frac{S}{S_0} \right) \right\} \cdot \frac{1}{59} \frac{\Delta}{\Delta + 0,65} + 0,26 (e_w - e) (1 + 0,4v) \frac{0,65}{\Delta + 0,65}$$

(6.2.4)

**utajone ciepło parowania** – suma ciepła potrzebna do przejścia wody w stanie ciekłym w parę wodną; wynosi 600 cal · g<sup>-1</sup>; tyle samo ciepła uwalniane jest podczas kondensacji



Formuła Penmana uwzględnia wielkość usłonecznienia (heliograf)

gdzie:

- $Et_p$  – miesięczne parowanie wskaźnikowe Penmana [mm],
- $N$  – liczba dni w miesiącu,
- $G_0$  – średnia suma dobową promieniowania słonecznego na górnej granicy atmosfery [ $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$ ],
- $\alpha$  – albedo powierzchni czynnej (średnie w okresie wegetacyjnym),  $\alpha = 0,20$ ,
- $S$  – dobowe usłonecznienie rzeczywiste w miesiącu [godz.],
- $S_0$  – dobowe usłonecznienie astronomiczne możliwe [godz.],
- $\delta$  – stała Stefana-Boltzmana [ $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],
- $T$  – średnia miesięczna temperatura powietrza [K],
- $e$  – średnie miesięczne ciśnienie pary wodnej [hPa],
- $\Delta$  – gradient ciśnienia pary wodnej nasyconej przy średniej temperaturze powietrza [hPa·K<sup>-1</sup>],
- $e_w$  – ciśnienie nasyconej pary wodnej przy danej temperaturze powietrza [hPa],
- $v$  – średnia miesięczna prędkość wiatru na wysokości 10 m n.p.g. [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ].

Aby skorzystać ze wzoru, powinny zostać zmierzone  $S$ ,  $T$ ,  $e$  oraz  $v$ ; wartości  $G_0$  i  $S_0$  należy odczytać z tablic słonecznych (*Tablice słoneczne...*, 1976), natomiast wartości wyrażen  $\delta T^4$ ,

$(0,56 - 0,08e^{0,5})$ ,  $e_w$ ,  $\frac{1}{59} \frac{\Delta}{\Delta + 0,65}$ ,  $0,26 \frac{0,65}{\Delta + 0,65}$  zostały tabelary-

zowane i przedstawione w zależności od temperatury powietrza i ciśnienia pary wodnej (Sarnacka i in., 1983). Formuła Penmana wymaga dość obszernej informacji, której uzyskanie nie zawsze jest możliwe. Mimo „nadmiernego empiryzmu” pozwala ona jednak dość dokładnie określić wielkość parowania utożsamianego z parowaniem ze swobodnego zwierciadła wody.

Rozkład terytorialny parowania terenowego przedstawia się na mapach **izotym**, czyli linii jednakowego parowania lub w postaci **wieloboków równego parowania**. Wykorzystuje się przy tym wartości parowania wyznaczone jedną z metod obliczeniowych w odniesieniu do punktów, którymi są najczęściej stacje meteorologiczne. Zasady wyznaczania izotym i wieloboków są analogiczne jak w przypadku określania opadów w zlewni (patrz rozdz. 3.1.1, 3.1.2). Można także zastosować metodę **obszarowego bilansu wodnego** (patrz rozdz. 8) i wówczas wielkość parowania odpowiada parowaniu z całej zlewni.

Tab. 6.2.1. Terminowe poprawki obserwowanej prężności pary wodnej ( $\Delta e$ ) oraz temperatury powietrza ( $\Delta t$ ) służące do określenia wielkości parowania terenowego za pomocą metody Konstantinowa

Terminy obserwacji		Poprawki $\Delta e$	Poprawki temperatury $\Delta t$ w zależności od temperatur obserwowanych									
Miesiąc	Dni	$e$	-20°C	-15°C	-10°C	-5°C	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
styczeń	0	0	0	0	0	0	0	0				
	6	0,1	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3				
	12	0,2	0,75	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5				
	15	0,2	0,95	0,9	0,8	0,75	0,6	0,6				
	18	0,25	1,2	1	1	0,9	0,8	0,7				
	24	0,3	1,5	1,4	1,3	1,15	1	0,9				
luty	30	0,4	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1				
	6	0,5	2,2	2,1	1,9	1,7	1,5	1,3				
	12	0,6	2,6	2,45	2,3	2	1,75	1,5				
	15	0,6		2,6	2,5	2,2	1,9	1,6				
	18	0,65		2,8	2,7	2,3	2	1,7				
marzec	24	0,7		3,2	3	2,6	2,3	1,9				
	1	0,8		3,7	3,4	3	2,6	2,1				
	6	0,9		4,1	3,8	3,3	2,9	2,3				
	12	0,9		4,5	4,2	3,7	3,2	2,5	1,6			
	15	0,9		4,7	4,4	3,8	3,3	2,6	1,7			
	18	1		4,9	4,6	4	3,45	2,7	1,7			
kwiecień	24	1,1			5	4,4	3,7	2,9	1,9			
	30	1,2				4,75	4	3,1	2			
	6	1,3				5	4,2	3,3	2,1			
	12	1,4				5,2	4,4	3,45	2,3			
	15	1,4				5,4	4,5	3,5	2,3			
	18	1,4				5,5	4,6	3,6	2,4			
maj	24	1,4					4,6	3,6	2,4			
	30	1,4					4,4	3,5	2,4	1,75		
	6	1,4					4,2	3,4	2,3	1,7		
	12	1,35					4	3,2	2,2	1,7	1,1	
	15	1,3					3,8	3,1	2,2	1,6	1,05	
	18	1,3					3,7	3	2,1	1,6	1	
czerwiec	24	1,2					3,3	2,9	1,9	1,5	1	
	30	1,1					2,8	2,4	1,7	1,35	0,9	
	6	0,9					2,4	2	1,5	1,2	0,8	0,4
	12	0,7					1,8	1,6	1,2	1	0,7	0,35
	15	0,65					1,5	1,3	1	0,8	0,6	0,3
	18	0,6					1,3	1,1	0,8	0,7	0,5	0,3
lipiec	24	0,3					0,7	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1
	30	0					0	0	0	0	0	0
	6	-0,3					-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3
	12	-0,6					-1,6	-1,2	-1	-1	-0,8	-0,5
	15	-0,8					-2	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,6
	18	-1					-2,3	-1,8	-1,6	-1,4	-1,1	-0,7
sierpień	24	-1,25					-2,9	-2,3	-2	-1,7	-1,4	-0,9
	30	-1,4					-3,2	-2,6	-2,3	-1,9	-1,6	-1
	6	-1,5					-3,6	-3	-2,6	-2,3	-1,8	-1,2
	12	-1,6					-3,8	-3,3	-3	-2,5	-2,1	-1,4
	15	-1,6					-3,9	-3,4	-3,1	-2,6	-2,2	-1,45
	18	-1,6					-4,1	-3,6	-3,2	-2,8	-2,3	-1,5
	24	-1,6					-4,2	-3,8	-3,4	-3	-2,5	-1,7
	30	-1,5					-4,4	-3,95	-3,6	-3,2	-2,6	

ciąg dalszy Tab. 6.2.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
wrzesień	6	-1,4					-4,4	-4	-3,6	-3,2	-2,7	
	12	-1,3					-4,2	-3,95	-3,6	-3,2	-2,6	
	15	-1,3					-4,2	-3,8	-3,5	-3,1	-2,6	
	18	-1,25				-4,5	-4,1	-3,8	-3,5	-3,1	-2,6	
	24	-1,2				-4,4	-3,95	-3,7	-3,3	-2,9	-2,45	
	30	-1,1				-4,3	-3,8	-3,6	-3,2	-2,8	-2,7	
październik	6	-1				-4,1	-3,6	-3,4	-3	-2,6	-2,15	
	12	-0,9			-4,2	-3,9	-3,4	-3,2	-2,8	-2,4		
	15	-0,9			-4,1	-3,8	-3,3	-3,1	-2,7	-2,3		
	18	-0,8			-3,9	-3,7	-3,2	-3	-2,6	-2,2		
	24	-0,7			-3,7	-3,4	-3	-2,7	-2,3	-2		
	30	-0,6			-3,4	-3,2	-2,7	-2,5	-2,1	-1,8		
listopad	6	-0,5		-3,3	-3,1	-2,9	-2,4	-2,2	-1,9	-1,6		
	12	-0,4		-3	-2,8	-2,5	-2,2	-1,9	-1,6	-1,3		
	15	-0,4		-2,7	-2,6	-2,3	-2	-1,8	-1,5	-1,2		
	18	0,3		-2,6	-2,4	-2,2	-1,8	-1,6	-1,3	-1,1		
	24	-0,25		-2,2	-2	-1,8	-1,5	-1,3	-1,1	-0,8		
	30	-0,2		-1,9	-1,8	-1,5	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7		
grudzień	6	-0,2		-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4		
	12	-0,1	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	-0,2		
	15	-0,1	-1	-0,9	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,1		
	18	-0,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0		
	24	0	0,3	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0	0			
	30		0	0	0	0	0					